

## 学習型FES制御器の実用的適用法に関する基礎研究

著者	赤池 尚也
雑誌名	東北大学電通談話会記録
巻	90
号	1
ページ	320-321
発行年	2021-08-20
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/00132939">http://hdl.handle.net/10097/00132939</a>

修士学位論文要約（令和 3 年 3 月）

## 学習型 FES 制御器の実用的適用法に関する基礎研究

赤池 尚也

指導教員：渡邊 高志

## A Basic Study on Practical Application of Learning Type FES Controller

Naoya AKAIKE

Supervisor: Takashi WATANABE

Various studies have been conducted for the practical application of functional electrical stimulation (FES), in order to restore paralyzed movements. Our research group has been studying the application of the FES controller using the feedback error learning (FEL-FES controller) in order to deal with the complex response characteristics of the musculoskeletal system. However, it was a problem that it is not realistic because the learning takes a lot of time with actual controlling of movements, which causes a heavy burden for the patient. In this study, a new learning system that conducts learning using computer simulation with the musculoskeletal model was examined for practical application. First, in order to improve the accuracy of the musculoskeletal model which is used for the learning of FEL-FES controller, a method to determine parameter values of the musculoskeletal model from simple measurements was examined. The results suggested that the accuracy of musculoskeletal model could be improved by determining its parameters from the data measured by a randomly varying stimulation pattern. Therefore, it was confirmed that the FEL-FES controller generally performed well in all subjects, which suggested that the FEL-FES controller trained using the proposed learning system could be applicable to clinical use.

## 1. はじめに

現在までに、機能的電気刺激 (FES)<sup>1)</sup>による動作再建法の臨床応用に向けて様々な研究が行われてきているが<sup>2)</sup>、1 つの大きな課題として、目標とする動作を実現するための電気刺激強度を決定する制御器の開発が挙げられる、そのため我々の研究グループでは筋骨格系の持つ複雑な応答特性に対応するため、フィードバック誤差学習法 (FEL 法)<sup>3)</sup>を用いた FES 制御器 (FEL-FES 制御器) の適用の検討を行ってきた。しかし、実際に制御しながら学習を行うことは、多くの時間がかかるため患者への負担が大きく現実的でないという問題があった。そこで本研究では、筋骨格系の電気刺激応答モデルを作成し、計算機シミュレーションを用いて学習を行う新たな学習システムを提案し、その学習システムの臨床への適用方法を検討した。

## 2. 提案する学習システムの概要

本研究では、計算機シミュレーションを用いて FEL-FES 制御器の学習を行うシステムを提案する。FEL 法の従来の学習システムを FES 制御に適用すると、制御対象に繰り返し電気刺激を印加しながら学習が進むことになる。しかし、提案する学習システムでは制御対象の電気刺激応答を模擬した筋骨格モデルを作成することで、学習繰り返し部を計算機シミュレーションで行うことができるため、学習時間、患者の負担の大幅な軽減が期待できる。この学習システ

ムを実現するためには、筋骨格モデルの作成が必須となるが、筋骨格系の持つ電気刺激応答は、患者ごとに大きく異なり、また、同じ患者においてもその時々によって異なることが想定される。したがって、その時々々の筋骨格系の電気刺激応答を、学習時に用いる筋骨格モデルに組み込む必要があり、そのために制御対象の電気刺激応答を計測する必要がある。

## 3. 学習に用いる筋骨格モデルの作成

学習に用いる筋骨格モデルは、非線形変換部と 2 次遅れ系線形ダイナミクス部の 2 部で構成した (図 1)。この筋骨格モデルを患者ごとに調整するためには、電気刺激応答を計測しそのパラメータを決定する必要がある。本研究では非線形変換部で表されるパラメータを患者ごとに調整し、2 次遅れ系線形ダイナミクス部で表されるパラメータは固定値とした。これは、2 次遅れ系線形ダイナミクス部のパラメータが、刺激強度や刺激パターンによって同一被験者でも変化が大きく、一つの値に決定するのが困難であると考えたためである。次に、非線形変換部のパラメータの決定方法として、刺激強度-関節角度関係の測定方法を 6 種類用意し、その測定方法からパラメータを近似した筋骨格モデルの精度を比較する実験を行った。



図 1 本研究で用いた筋骨格モデルの構造

実際に行ったパラメータの近似は、ステップ応答から近似(step)、ランプ応答から近似(ramp)、ランダムに変化する刺激2種類に対する応答特性から近似(rdm-a, rdm-b)、3秒周期と14秒周期の正弦波刺激に対する応答特性から近似(sin-3, sin-14)の計6種類の計測結果から行った。このように作成した6個の筋骨格モデルと実際の膝関節に同様の刺激を印加した際の関節角度の応答を比較し、その平均誤差を算出したものを図2に示す。図2において平均誤差の小さかったモデルはrdm-a, rdm-b, sin-3であり、これらは刺激強度の増減が急峻な刺激に対する応答特性から作成を行ったモデルである。これは、刺激強度の増減を含む刺激に対する応答を測定することで、刺激強度増加方向の応答特性と刺激強度減少方向の応答特性を近似的に筋骨格モデルに含ませることができたため、モデルの出力が実測値に近づいたと考えられる。

#### 4. FEL-FES 制御器による追従制御実験

図2で示したsin-3の精度が最もよかったため、その筋骨格モデルを用いて学習を行い、FEL-FES制御器の制御能力を評価するための実験を行った。被験者は健康男性3名(A~C)であり、大腿直筋に電気刺激を印加することで、椅子に座って脱力した状態の被験者の膝関節角度を制御した。被験者Cにおける追従制御の制御結果を図3に、すべての被験者における目標軌道と実現軌道の平均誤差の平均値を図4に示す。図3での目標軌道は周期2秒であり150ms程度の無駄時間と200ms程度の応答遅れを持つ下肢関節の制御において十分に速い運動といえるが、フィードバック制御で問題になる遅れも改善され、精度よく制御できているといえる。この結果より、十数秒程度の電気刺激応答計測だけで、その患者にあった制御器を構築し、制御可能になることが示唆された。また、図4から、全ての被験者において、ANNによるフィードフォワード制御では誤差が大きくなってしまっても、FEL-FES制御器においては制御器が概ね良好に動作していることがわかる。

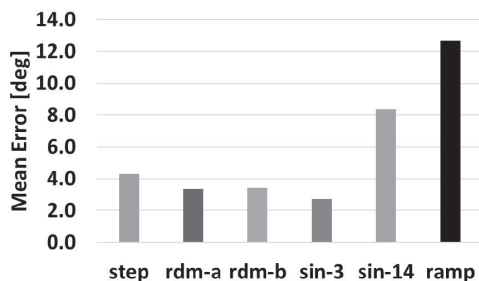


図2 各モデルの実測値に対する平均誤差

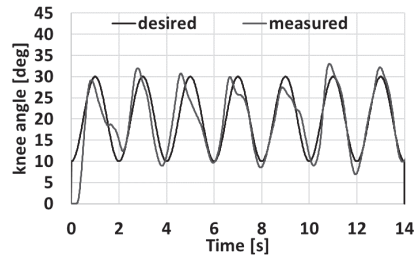


図3 被験者Cにおける追従制御結果

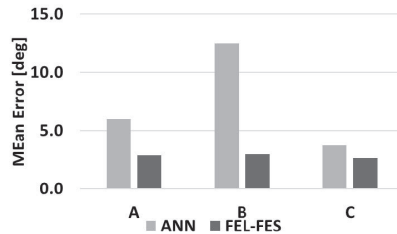


図4 全被験者の目標軌道との平均誤差

#### 5. まとめ

本研究ではFEL-FES制御器の学習の際の患者の負担や学習にかかる時間を軽減させるための新たな学習システムを提案した。さらに、その学習システムにおいて必要な筋骨格モデルの作成方法を検討した結果、刺激強度の増減を含む刺激に対する応答特性からモデルのパラメータを決定することで、筋骨格モデルの出力が実測値に近づくことが確認された。また、その筋骨格モデルを用いて提案した学習システムで学習を行ったFEL-FES制御器が、すべての被験者において概ね良好な動作をしたことから、臨床への適用可能性が示唆された。

#### 文献

- 1) J. Yang, M. L. Boninger, J. D. Leath, S. G. Fitzgerald, T. A. Dyson-Hudson, and M. W. Chang, "Carpal Tunnel Syndrome in Manual Wheelchair Users with Spinal Cord Injury A Cross-Sectional Multicenter Study," American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation, vol. 88, no. 12, pp. 1007-1016, (Dec. 2009).
- 2) R. Turk, P. Obreza: Functional electrical stimulation as an orthotic means for the rehabilitation of paraplegic patients, Paraplegia, Vol.23, pp.344-348, (1985)
- 3) 川人光男 著, "脳の計算理論", pp.119-189, 産業図書(東京), 1996.